中国低碳冷链物流发展水平评价体系研究

杨　斌[1,2,3,4]，韩佳伟[1,2,3]，杨　霖[1,2,3]，任青山[1,2,3]，杨信廷[1,2,3*]

（1. 北京市农林科学院信息技术研究中心，北京 100097；2. 农产品质量安全追溯技术及应用国家工程研究中心，北京 100097；3. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室，北京 100097；4. 天津农学院 计算机与信息工程学院，天津 300384）

摘　要：近年来，中国冷链物流行业进入快速发展阶段，冷链基础设施建设与市场需求量呈不断增长态势，同时也伴随着温室气体排放量的增加。为满足未来低碳经济发展要求，绿色低碳转型成为中国冷链行业高质量健康发展的新特征与新方向，但前提基础是精确认知低碳冷链物流发展状况。鉴于此，本文首先从能源转型、技术创新、经济效益、国家政策四个层面构建中国低碳冷链物流发展评价体系，并针对不同指标进行权重以及障碍度分析，探究不同指标对低碳冷链物流发展的影响度；其次，采用熵权-优劣解距离法（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution，TOPSIS）评价模型对中国2017至2021年低碳冷链物流发展情况进行评分，确定中国低碳冷链物流发展情况。研究结果表明，在不同指标中，绿色包装材料使用增长率、低碳技术论文发表数、科研人员占比、生鲜农产品冷链物流需求量增长率、氢氯氟烃制冷剂缩减率权重占比分别达到0.1243、0.1074、0.1066、0.0982、0.0716，对中国低碳冷链物流发展影响较大；2017至2021年间，中国低碳冷链物流发展水平评分从0.1498到0.2359，同比增长约57.5%；中国低碳冷链物流发展虽总体呈现上升趋势，但依旧处于发展阶段。

关键词：低碳；冷链物流；熵权-TOPSIS模型；障碍度；碳排放

中图分类号：TB66;F259.22　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202301011

引用格式：杨斌, 韩佳伟, 杨霖, 任青山, 杨信廷 . 中国低碳冷链物流发展水平评价体系研究[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(1): 44-51.

YANG Bin, HAN Jiawei, YANG Lin, REN Qingshan, YANG Xinting. Evaluation system of China's low-carbon cold chain logistics development level[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(1): 44-51.

1　引　言

伴随着全球经济的快速发展与世界人口的持续增长，温室气体排放对生态环境与可持续发展的恶性影响已经引起世界各国的高度关注[1]。在本世纪中叶之前，若世界各国仍保持现有发展模式，不采取任何行动有效平衡经济发展与环境保护，将会引发温室气体排放加重，全球温度进一步升温，进而直接威胁到人类生存[2]。因此，在2015年第21届联合国气候变化大会上，178个国家共同签署了《巴黎协定》（*The Paris Agreement*），明确提出将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2 ℃以内，并努力将温度上升幅度限制在1.5 ℃以内。协定也指出全球应尽快实现温室气体排放达到峰值，本世纪下半叶实现温室气体净零排放，才可有效降低气候变化对地球生态风险与人类生存危机的负面效应。从2006年至今，中国是世界上最大的碳排放国，2021二氧化碳排放量约为11.21×10^9 t[3]，约占全球碳排放总量的31.59%。为积极响应全球气候

收稿日期：2023-01-25

基金项目：北京市农林科学院科技创新能力建设专项（KJCX20210408）；国家重点研发计划项目课题（2022YFD2001804）；江苏省农业科技自主创新资金（CX221014）

作者简介：杨 斌，硕士研究生，研究方向为智慧低碳供应链关键技术。E-mail：18330806590@163.com

*通信作者：杨信廷，博士，研究员，研究方向为智慧低碳供应链关键技术。E-mail：yangxt@nercita.org.cn

变暖问题，中国政府相序出台了相关政策与监管体系，加快各行业绿色低碳转型，力争在2030年和2060年前分别实现“碳达峰”和“碳中和”（即“双碳”战略目标）[4]。

农产品冷链物流是维持粮食安全的重要“守护者”，但低温环境的持续稳定维持需消耗大量石化或电力能源。据中国物流与采购联合会（China Federation of Logistics & Purchasing，CFLP）报告显示，中国生鲜农产品采后冷链每年需要消耗约800亿元的电力能源用于低温制冷。此外，中国冷链物流覆盖率低且基础设施落后，高食品腐损率与制冷剂泄漏问题也加重了冷链碳排放问题[5]。因此，冷链物流绿色低碳转型将是助力中国“双碳”目标实现的关键环节，也是推动冷链物流高质量健康发展的主要关注点与研究热点。学者们已经开展相关研究以期推动冷链物流的低碳转型，例如Deng等[6]提出了一种新型太阳能光伏直接驱动蓄冷系统，可节省整个系统65.27%的电力成本。Xu等[7]也提出太阳能发电技术是促进冷储能源转换和减少冷链碳排放的主要驱动力。Zhao等[8]开发了一个进化博弈模型，以分析多种因素对电动冷藏车升级和渗透策略的影响，并阐明了冷链物流企业和冷藏车制造商的最优政府补贴政策。因此，以上研究表明能源转型、绿色低碳技术创新、决策优化和政策完善是推动绿色低碳冷链物流发展的基本路径。然而，精准认知冷链物流低碳发展水平是正确把控现状问题、合理规划战略目标、技术瓶颈精准发力等方面的前提基础。因此，展开中国低碳冷链物流发展水平量化评价势在必行，以期为中国构建冷链物流绿色低碳综合研究体系与制定针对性的碳减排控制策略提供基础依据与理论支撑[9]。冷链物流低碳发展水平评价涉及指标较多，评价指标体系构建与数据获取等方面存在问题突出，仍需展开进一步研究与探索。

鉴于此，本文基于低碳物流高质量发展的内涵，从能源转型、技术创新、经济效益和政策制定4个方面，构建低碳冷链物流发展水平定量评估体系，明确低碳冷链发展关键影响因子并量化其影响程度，分析冷链物流低碳发展的阻碍因素并提出相关对策建议。

2　低碳冷链物流发展的内涵

冷链物流是指生鲜农产品在采后到销售的全过程中保持低温或恒温的状态流通的活动，主要包括预冷、贮藏、运输以及销售四个重要环节，而每个环节都存在不同程度的碳排放[10]。尽管中国冷链物流行业起步较晚，但由于近年来国民消费升级以及生鲜电商的快速发展，中国冷链物流行业也进入了快车道，不止冷链基础设施不断增加，同时冷链供应链体系也不断健全，与冷链物流行业快速发展同时到来的是其碳排放总量的不断增加[11-13]。因此，在“双碳”目标背景下，中国冷链物流产业正面临着规模扩张与碳排放控制的尖锐矛盾，必须加快减排降耗以及低碳转型的脚步，推动冷链物流行业体系的发展，实现冷链物流的可持续发展。此前，各国学者针对低碳冷链物流的研究主要集中于能源转型、技术创新、决策优化三方面[14-17]，通过使用清洁能源或改进传统冷链物流设备等方式降低冷链物流碳排放。而《“十四五”冷链物流发展规划》也指出，中国部分冷链物流基础设施老旧，在运行过程中会产生较高的碳排放量，而目前对于优化冷链物流全生命周期内的基础设施与碳排放管理监测方面的研究较少。因此，未来低碳冷链物流的发展趋势主要包括两方面[18]：一方面企业应当加快自身能源转型，使用更加清洁的能源，加快自身运营管理模式的改进，同时引进更加先进的技术，监测自身碳排放量，以便及时调整自身决策；另一方面，政府部门应当尽快制定出完善的碳排放政策法规以及行业标准，对使用节能设施的企业提供低碳补贴，以激励和引导更多的企业减少碳排放。

低碳发展在建设现代化冷链物流体系中是极其重要的一个要素，这不仅仅是降低CO_2排放，而是涉及能源、环境、贸易、政府、企业、个人、生产、消费、管理等诸多方面，是一个全社会共同支持的过程[19]。人们现有的对于低碳冷链物流的认识大多从低碳经济发展而来，对于低碳冷链物流发展的内涵目前还没有明确的定义，就目前而言，低碳冷链物流发展的内涵是通过利用新型能效技术、清洁能源、管理方式以及国家政策调控冷链物流行业，在降低冷链物流行业CO_2排放量的同时，确保冷链物流行业的社会、生态以及经济效益。

3 评价体系构建

3.1 总体评价思路

在双碳背景下，低碳冷链物流是一个复杂的研究领域，在保障食品质量安全的前提下，还必须要平衡冷链物流行业需不断发展与温室气体排放应逐步减少之间的矛盾[20]。而低碳冷链物流发展涉及经济、环境、社会等不同方面，因此，在构建低碳冷链物流发展评价体系时，需从能源转型、技术创新、经济效益与政策制定四方面切入，并以此作为评价体系的准则层。具体而言，能源转型强调能源结构的调整，从根本上减少温室气体的排放，技术创新则更加关注冷链物流发展过程中对低碳化的适应性，以加快完成冷链物流的低碳转型，经济效益强调低碳冷链物流行业中投资与收益最终成果的尺度，政策制定侧重于国家对低碳冷链物流发展的重视程度。

为保障低碳冷链物流发展水平评价体系与实际发展程度的契合程度，根据相关标准，在选取评价指标时主要依据四条基本原则[21]：

（1）代表性。即评价指标需能够全面反映评价对象的本质特征。

（2）确定性。选取指标的数值需要具有确定的高低意义。

（3）独立性。选取的各指标之间不应具有包含关系。

（4）可操作性。指标体系构建时要充分考虑现实情况，避免数据无法获取。

3.2 评价体系的构建

在回顾现有低碳冷链物流发展水平评价体系的基础上，按照相关原则，本研究首先初步确定30项评价指标，随后咨询了冷链物流领域的7位专家，针对指标本身以及数据获取的可能性，确定了最终评价体系的各项指标，构建了最终的低碳冷链物流发展水平评价体系，如表1所示。

表1 低碳冷链物流发展水平评价体系

Table 1 Evaluation system of low carbon cold chain logistics development level

目标层	准则层	指标层	属性
低碳冷链物流发展水平	能源转型	清洁能源设备增长量	+
		可再生能源占行业总购电量的比例	+
		氢氯氟烃制冷剂使用量	−
		绿色包装材料使用率	+
	技术创新	低碳技术论文发表数	+
		低碳技术专利成果数	+
		低碳冷链标准制定数	+
		科研人员占比	+
	经济效益	员工年可支配收入增长率	+
		行业市场规模	+
		冷链成本占行业GDP比重	−
		生鲜农产品冷链物流需求量增长率	+
	政策制定	国家财政拨款增长率	+
		碳约束政策出台数	+

注：+为正向指标；−为负向指标

（1）能源转型。过去能源转型常指国家能源结构的重大变革，而对于冷链物流行业的能源转型则往往需要建立在国家政策的框架之上，这些政策框架可以加快行业的能源转型并决定其方向。本文通过结合国家政策（包括风电、新能源设备、可降解包装材料等）选取了清洁能源设备增长量、可再生能源占行业总购电量的比例、氢氯氟烃制冷剂使用量、绿色包装材料使用率作为“能源转型”这一准则的指标。

（2）技术创新。技术创新指开发新产品以及对

原有工艺或装备进行优化，涉及政府、企业、高校、研究所等多个主体，技术是产业发展的源头，推动技术创新可以加快低碳冷链物流发展过程。本文结合技术创新的内涵从知识产权的产出、技术创新、人力资源等角度结合数据获取的可能性，选取了低碳技术论文发表数量、低碳技术专利成果数、低碳冷链标准制定数、科研人员占比四项指标作为技术创新指标。

（3）经济效益。经济效益需要兼顾行业资源分配与资源利用，同时，经济效益与行业发展相互依存、相互影响。因此，本文从经济效益的角度根据GB/T 3533.1-2017《标准化效益评价 第1部分：经济效益评价通则》选取了员工年可支配收入增长率、行业市场规模、冷链成本占行业GDP比重、生鲜农产品冷链物流需求量增长率四项指标，探究其对低碳冷链物流发展的影响。

（4）政策制定。政策制定通常指国家政府为达到奋斗目标，以权威的形式标准化规定具体措施的行为。国家政策具有导向、管制、调控、分配等多项功能，通过国家相关行为可以大大加快低碳冷链物流发展进程。因此，本文通过结合中国政府网国务院发布《国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》，选取了国家财政拨款增长率和碳约束政策出台数量作为政策制定指标，探究其对低碳冷链物流的影响。

3.3 评价方法

熵权法是一种客观赋权方法，相比于层次分析法等主观赋权法，熵权法依靠指标数据本身，排除了专家判断的主观性。优劣解距离法（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution，TOPSIS）则是一种综合评价方法，它通过利用原始数据的信息，精确反映各评价方案之间的差距。本文通过使用熵权-TOPSIS评价模型对低碳冷链物流发展水平进行评价，可在避免主观性的基础上，确定评价对象的优劣，提高评价结果的科学性以及可靠性[22]。具体步骤如下：

（1）首先采用熵权法确定不同指标的权重。为了避免各指标量纲不同对最终评价结果造成影响，需对各指标进行标准化处理，即根据各指标不同含义将指标分为正向指标（+）及负向指标（-），计算方法见公式（1）和（2）。

$$\text{正向指标:}\ d_i = \frac{x_{ij} - x_{ij(\min)}}{x_{ij(\max)} - x_{ij(\min)}} \tag{1}$$

$$\text{负向指标:}\ d_i = \frac{x_{ij(\max)} - x_{ij}}{x_{ij(\max)} - x_{ij(\min)}} \tag{2}$$

其中，d_i为标准化后的指标数值；x_{ij}代表第j年第i个评价指标的原始值。

（2）依据信息熵的定义，可以确定指标熵值，进而确定其离散度，熵值越小离散程度越大，计算方法见公式（3）。

$$e_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i \times \ln d_i}{\ln n} \tag{3}$$

其中，e_i为第i个指标的熵值。

（3）依据上一步中信息熵，计算各指标信息效用值（$1-e_j$），并对各指标的信息效用值进行归一化处理，得到各项指标权重，计算方法见公式（4）。

$$w_i = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^{n} 1 - e_j} \tag{4}$$

其中，w_i为第i个指标的障碍度。

（4）为确定不同指标对中国低碳冷链物流的影响程度，通过准则层权重与各指标权重对指标层各指标进行障碍度计算，以确定限制低碳冷链物流发展的关键因素，具体计算方法见公式（5）。

$$z_i = \frac{(1 - e_i) \times d_i}{\sum_{i=1}^{n} (1 - e_i) \times d_i} \tag{5}$$

其中，Z_i为第i个指标的障碍度。

（5）为避免主观因素的影响，得到指标权重后，通过其权重向量及标准化矩阵建立加权决策矩阵，方法如公式（6）。

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{d} \times \boldsymbol{e} = [v_{ij}]_{m \times n} \tag{6}$$

其中，$\boldsymbol{v}$为m行n列的加权决策矩阵；v_{ij}为指标i在第j年加权规范后的指标值。

（6）因TOPSIS评价模型须通过评价对象与最优解、最劣解的距离进行评价，因此，需确定各指标的正负理想解，计算方法见公式（7）。

$$\begin{aligned} v^+ &= \max\ \{ v_{1j}, v_{2j}, v_{3j}, \cdots, v_{ij} \} \\ v^- &= \min\ \{ v_{1j}, v_{2j}, v_{3j}, \cdots, v_{ij} \} \end{aligned} \tag{7}$$

其中，v^+为正理想解；v^-为负理想解。

（7）为了量化各年份评分，需通过上述正负理想解计算正负理想解的欧氏距离，计算方法见公式（8）和（9）。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_{ij} - v^+)^2} \tag{8}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_{ij} - v^-)^2} \tag{9}$$

其中，d_i^+为正理想解的欧氏距离；d_i^-为负理想解的欧氏距离。

计算贴近度，本文中取值范围为0～1，越接近1表示评价对象评分越好，计算方法见公式（10）。

$$c_i = \frac{d_i^-}{(d_i^- + d_i^+)} \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, m) \tag{10}$$

其中，c_i为贴近度。

4　案例评价研究

4.1　案例概述

通过不同年份中国低碳冷链物流发展情况的差异性，对中国低碳冷链物流的发展变化情况与主要影响因素进行分析。本文采用上述介绍的熵权-TOPSIS评价模型，通过对获取的不同年份的指标数据进行计算，得到对应年份的中国低碳冷链物流发展水平。其中，香港特别行政区、澳门特别行政区与台湾省因数据统计不完整，未纳入本研究。

4.2　数据来源

本文所涉及到的数据主要来自于国家统计局、财政部、生态环境部、国家知识产权局、工标网、《中国冷链发展报告》《中国统计年鉴》，以及部分企业提供数据，其中基于国家发布的数据通过相应发布网站统计获得，基于企业获取的指标数据，通过综合中小型以及大型冷链企业计算获得。

4.3　结果与分析

本文根据评价指标选取相关原则，从能源转型、技术创新、经济效益、政策制定四个方面，选取了表1所提到的14个指标，根据上述基于熵权-TOPSIS评价模型得到低碳冷链物流发展水平的综合评价结果，其有关分析如下。

4.3.1　指标权重分析

从表2可以看出指标层中权重占比最大的前五项指标分别为绿色包装材料使用增长率、低碳技术论文发表数、科研人员占比、生鲜农产品冷链物流需求量增长率、氢氯氟烃制冷剂缩减率。其中绿色包装材料使用增长率权重占比最大，达到0.1243，这可能主要归因于在国际绿色包装的浪潮下，中国不断加大绿色包装材料的使用，以适应各国对包装材料的要求。而低碳技术论文发表数、科研人员占比的权重相近，分别达到了0.1074、0.1066，这说明了科技创新对低碳冷链物流发展具有重要的推动作用。此外，准则层中“能源转型”这一准则权重占比最大，达到0.3270，但“技术创新”的权重占比接近“能源转型”，达到了0.3179，这可能主要归因于“能源转型”与“技术创新”相互促进，“能源转型”推动“技术创新”的进程，同时，“技术创新”加快“能源转型”的脚步，共同在冷链物流低碳发展中具有引领作用。此外，不同指标对中国低碳冷链物流的障碍度中排名前五的指标为绿色包装材料使用增长率、低碳技术论文发表数、科研人员占比、生鲜农产品冷链物流需求量增长率和氢氯氟烃制冷剂使用量，其障碍度分别达到19.07%、14.24%、14.04%、11.90%和6.33%，可发现对中国低碳冷链物流发展影响程度最大的指标为绿色包装材料使用增长率，占比达到近20%，再次展示了加工环节的低碳化对于低碳冷链物流行业的重要影响，而障碍度排名前五的指标与权重占比前五的指标相同，也印证了该五项指标对中国低碳冷链物流发展的影响程度。因此，在以后冷链物流低碳发展的过程中，应促使企业加快能源转型的步伐，并对低碳冷链物流相关技术进行创新以更加高效地促进冷链物流行业的低碳发展。

4.3.2　低碳冷链物流发展水平评价分析

图1中展示了2017年至2021年中国低碳冷链物流发展水平评分变化情况，可以看出，2017至2021年间，中国低碳冷链物流发展水平评分由0.1498升至0.2359，同比增长约57.5%，整体呈现上升趋势。这可能归因于近年来我中国冷链物流市场内规模的快速增长，推动了冷链行业的创新步伐，低碳冷链物流设备的研发与应用不断加快，同

表2 低碳冷链物流发展水平指标权重及障碍度表

Table 2 Index weight and obstacle degree of low carbon cold chain logistics development level

目标层	准则层	权重	指标层	权重	障碍度/%
低碳冷链物流发展水平	能源转型	0.3270	清洁能源设备增长量	0.0712	6.25
			可再生能源占行业总购电量的比例	0.0599	4.43
			氢氯氟烃制冷剂使用用量	0.0716	6.33
			绿色包装材料使用增长率	0.1243	19.07
	技术创新	0.3179	低碳技术论文发表数	0.1074	14.24
			低碳技术专利成果数	0.0624	4.80
			低碳冷链标准制定数	0.0415	2.13
			科研人员占比	0.1066	14.04
	经济效益	0.2519	员工年可支配收入增长率	0.0457	2.58
			行业市场规模	0.0673	5.60
			冷链成本占行业GDP比重	0.0407	2.05
			生鲜农产品冷链物流需求量增长率	0.0982	11.90
	政策制定	0.1032	国家财政拨款增长率	0.0503	3.12
			碳约束政策出台数	0.0529	3.47

时政府部门不断推动各种新型节能环保技术的研发，这也促使低碳冷链发展水平的增长。

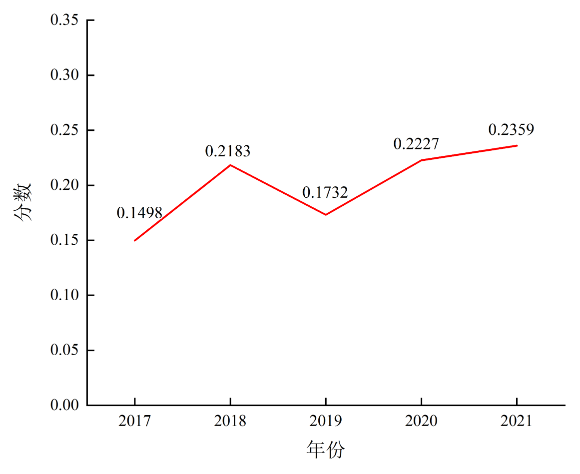


图1 低碳冷链物流发展水平评分结果图

Fig. 1 Scoe results of low carbon cold chain logistics development level

此外，2019年中国低碳冷链物流发展水平评分低于2018年，由0.2183降至0.1732，同比减少约20.6%，这可能归因于2018年中国冷链进入快速发展阶段，2019年度尽管各项指标都有所增长，但因2018年原始基数较大，导致其增长率相对减少，因此出现2019年中国低碳冷链物流发展水平评分低于2018年的现象。

5 结论与建议

本研究利用熵权-TOPSIS评价模型，通过在评价过程中加入熵权法计算而来的加权矩阵，充分利用2017～2021年间各指标原始数据所包含的信息，反映各年份中国低碳冷链物流发展水平的变化情况。最终通过对各指标权重占比、障碍度以及各年份低碳冷链物流总体评分进行分析，得出分析结论：

（1）尽管中国低碳冷链物流发展水平评分总体呈现增长趋势，但其得分依旧较低，这表明中国低碳冷链物流尚处于发展阶段，还需要各方不断努力以提升冷链物流低碳化水平。

（2）“能源转型”与“科技创新”对中国冷链物流低碳发展的影响较大，此外，绿色包装材料使用增长率权重占比达到0.1224。这表明，社会通常认为的冷链物流包括四个重要环节——预冷、贮藏、加工、销售这一观念需要进行改变，在冷链低碳发展过程中，加工也成为必须要重视的一环。

（3）在“政策制定”这一准则中，无论各指标权重占比还是权重总占比都相对较低，这表明尽管国家加大对冷链物流的重视程度，但中国相关政策依旧不完善，还需要相关部门尽快完善相关政策体系。

针对以上结论，针对低碳冷链物流发展现状，并从民众、企业以及国家的角度提出相关建议，以期加快中国低碳冷链物流发展：

（1）多渠道宣传低碳观念，强化全民低碳意识。一是强化低碳消费的意识，提高消费者对冷链物流碳排放和生态环境之间的认识，助力消费者选择低碳产品，消费者才是促进企业进行低碳转变的源头。二是加快转变企业管理者自身固有观念，中国已进入高质量发展阶段，冷链企业管理者应自觉推动低碳冷链物流的优化与创新。

（2）加速企业能源转型步伐，持续创新绿色节能技术。一是冷链物流企业应加快能源转型，淘汰非标准化冷链物流设施，加大清洁能源设备比例，推动冷链物流全程碳排放缩减。二是企业与相关研究单位应加快创新步伐，改善仓储、运输等用能较高的环节，尽快完成企业用能结构优化以及低碳技术的研发与应用，实现冷链物流企业健康可持续的发展。

（3）完善低碳冷链物流发展政策，建立健全相关标准体系。一是政府部门应强化相应政策支持，如碳税以及碳补偿政策，以激励引导冷链物流企业进行相关科研创新以及能源转型，同时在对冷链物流企业进行约束的同时还应当拓展冷链物流企业的融资通道，优化冷链物流行业营商环境。二是加速构建冷链物流行业标准体系，当前中国冷链物流低碳发展相关标准体系尚不健全，加快对中国冷链物流绿色化、智能化等重点领域的标准制定与修改，并支持各地方政府部门根据自身行业发展需要制定相关标准。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] JIANG T Y, YANG J, HUANG S J. Evolution and driving factors of CO_2 emissions structure in China's heating and power industries: The supply-side and demand-side dual perspectives[J]. Journal of cleaner production, 2020, 264: ID 121507.

[2] SUN K Q, XIAO H Q, LIU S Y, et al. A review of clean electricity policies—From countries to utilities[J]. Sustainability, 2020, 12(19): ID 7946.

[3] WANG Y, GUO C H, CHEN X J, et al. Carbon peak and carbon neutrality in China: Goals, implementation path and prospects[J]. China geology, 2021, 4(4): 720-746.

[4] 张凯, 王冠. 碳监测评估信息化发展的战略导向、体系架构及应用探索——基于科技支撑"双碳"目标的前瞻性思考[J]. 企业经济, 2023, 42(1): 96-103.
ZHANG K, WANG G. Strategic orientation, system structure and application exploration of carbon monitoring and evaluation informatization development[J]. Enterprise economy, 2023, 42(1): 96-103.

[5] MERCIER S, VILLENEUVE S, MONDOR M, et al. Time-temperature management along the food cold chain: A review of recent developments[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2017, 16(4): 647-667.

[6] DENG Q J, YANG Z, ZHANG L, et al. The control strategy and economic analysis of a new type of solar cold storage[J]. Journal of energy storage, 2022, 52: ID 104865.

[7] XU T, DU H S, LIU H Y, et al. Advanced nanocellulose-based composites for flexible functional energy storage devices (adv. mater. 48/2021) [J]. Advanced materials, 2021, 33(48): ID 2170381.

[8] ZHAO C, MA X Y, WANG K. The electric vehicle promotion in the cold-chain logistics under two-sided support policy: An evolutionary game perspective[J]. Transport policy, 2022, 121: 14-34.

[9] WANG B J, WU Y F, ZHAO J L. Comprehensive evaluation on low-carbon development of coal enterprise groups[J]. Environmental science and pollution research, 2019, 26(18): 17939-17949.

[10] 张潇方, 刘升, 贾丽娥, 等. 樱桃冷链物流保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2016, 16(5): 120-124.
ZHANG X F, LIU S, JIA L E, et al. Research progress on cold chain logistics technique of cherry[J]. Storage and process, 2016, 16(5): 120-124.

[11] DONG Y B, XU M, MILLER S A. Overview of cold chain development in China and methods of studying its environmental impacts[J]. Environmental Research Communications, 2021, 2(12): ID 122002.

[12] ZHAO H X, LIU S, TIAN C Q, et al. An overview of current status of cold chain in China[J]. International journal of refrigeration, 2018, 88: 483-495.

[13] 原惠群, 杨家其. 低碳时代我国农产品冷链物流发展的障碍与思考[J]. 开发研究, 2012(5): 56-59.
YUAN H Q, YANG J Q. Obstacles and reflections on the development of cold chain logistics of agricultural products in China in the low-carbon era[J]. Research on development, 2012(5): 56-59.

[14] NIU B L, ZHANG Y F. Experimental study of the refrigeration cycle performance for the R744/R290 mixtures[J]. International journal of refrigeration, 2007, 30(1): 37-42.

[15] LIU M, SAMAN W, BRUNO F. Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material[J]. Applied energy, 2012, 92: 336-342.

[16] ZHANG S Y, CHEN N, SONG X M, et al. Optimizing decision-making of regional cold chain logistics system in

view of low-carbon economy[J]. Transportation research part A: Policy and practice, 2019, 130: 844-857.

[17] 王旭坪, 董杰, 韩涛, 等. 考虑碳排放与时空距离的冷链配送路径优化研究[J]. 系统工程学报, 2019, 34(4): 555-565.
WANG X P, DONG J, HAN T, et al. The optimization of cold chain delivery routes considering carbon emission and temporal-spatial distance[J]. Journal of systems engineering, 2019, 34(4): 555-565.

[18] MAKULE E, DIMOSO N, TASSOU S A. Precooling and cold storage methods for fruits and vegetables in sub-saharan africa: A review[J]. Horticulturae, 2022, 8(9): 776.

[19] LIU L Q, LIU C X, SUN Z Y. A survey of China's low-carbon application practice: Opportunity goes with challenge[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2011, 15(6): 2895-2903.

[20] CHEN Q, QIAN J P, YANG H, et al. Sustainable food cold chain logistics: From microenvironmental monitoring to global impact[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2022, 21(5): 4189-4209.

[21] SHI L Y, XIANG X Q, ZHU W, et al. Standardization of the evaluation index system for low-carbon cities in China: A case study of Xiamen[J]. Sustainability, 2018, 10 (10): ID 3751.

[22] YANG X, ZHAO X A, GONG X, et al. Systemic importance of China's financial institutions: A jump volatility spillover network review[J]. Entropy, 2020, 22(5): ID 588.

Evaluation System of China's Low-Carbon Cold Chain Logistics Development Level

YANG Bin[1,2,3,4], HAN Jiawei[1,2,3], YANG Lin[1,2,3], REN Qingshan[1,2,3], YANG Xinting[1,2,3*]

(1. *Research Center of Information Technology*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*; 2. *National Engineering Laboratory for Agri-product Quality Traceability*, *Beijing* 100097, *China*; 3. *Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100097, *China*; 4. *School of Computer and Information Engineering*, *Tianjin Agricultural University*, *Tianjin* 300384, *China*)

Abstract: In recent years, China's cold chain logistics industry has entered a stage of rapid development. At the same time, with the increase of greenhouse gas emissions, green and low-carbon transformation has become a new feature and direction of high-quality and healthy development of the cold chain industry to meet the future development needs of China's low-carbon economy. In view of this, in order to ensure the scientificity of China's low-carbon cold chain logistics evaluation system, in this paper, 30 indicators from the four levels of energy transformation, technological innovation, economic efficiency, and national policy based on different relevant levels were first preliminarily determined, and finally 14 indicators for building China's low-carbon cold chain logistics development evaluation system through consulting experts and the possibility of data acquisition were determined. Data from 2017 to 2021 were selected to conduct a quantitative evaluation of the development level of low-carbon cold chain logistics in China. Firstly, the entropy weight method was used to analyze the weight and obstacle degree of different indicators to explore the impact of different indicators on the development of low-carbon cold chain logistics; Secondly, a weighted decision-making matrix was constructed based on the weights of different indicators, and the technology for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) evaluation model was used to evaluate the development of low-carbon cold chain logistics in China from 2017 to 2021, in order to determine the development and changes of low-carbon cold chain logistics in China. The research results showed that among the 14 different indicators of the established evaluation system for the development of low-carbon cold chain logistics in China, the growth rate of the use of green packaging materials, the number of low-carbon technical papers published, the proportion of scientific research personnel, the growth rate of cold chain logistics demand for fresh agricultural products, and the reduction rate of hydrochlorofluorocarbon refrigerants account for a relatively large proportion, ranking in the top five, respectively reaching 0.1243, 0.1074, 0.1066, 0.0982, and 0.0716, accounting for more than half of the overall proportion. It has a significant impact on the development of low-carbon cold chain logistics in China. From 2017 to 2021, the development level of China's low-carbon cold chain logistics was scored from 0.1498 to 0.2359, with a year-on-year increase of about 57.5%, indicating that China's low-carbon cold chain logistics development level was relatively fast in the past five years. Although China's low-carbon cold chain logistics development has shown an overall upward trend, it is still in the development stage.

Key words: low carbon; cold chain logistics; Entropy weight - TOPSIS model; barriers; carbon emission